

**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА  
ФИЛИАЛ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА В ГОРОДЕ СЕВАСТОПОЛЕ  
НЕПРАВИТЕЛЬСТВЕННЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФОНД  
ИМЕНИ В.И. ВЕРНАДСКОГО**

**Российская экологическая Академия  
Крымское региональное отделение**

**Русское географическое общество  
Севастопольское отделение**

**Институт географии РАН  
Российской Федерации**



**НЕПРАВИТЕЛЬСТВЕННЫЙ  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФОНД  
ИМЕНИ В.И. ВЕРНАДСКОГО**

# **МАТЕРИАЛЫ**

## **I МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФОРУМ В КРЫМУ**



**«Крым  
эколого-экономический  
регион. Пространство  
ноосферного развития»**

при поддержке фонда  
РФФИ (проект №  
17-05-20261)



**Г. СЕВАСТОПОЛЬ. 20 - 24 ИЮНЯ 2017 ГОДА**

матических и антропогенных факторов / Препринт.— Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006.— 90 с.

4. Мезенцева И.В., Котельянец Е.А., Совга Е.Е. Ассимиляционная емкость экосистем морских мелководных акваторий с различным уровнем антропогенной нагрузки как метод оценки их самоочистительной способности // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития». — Москва, 20-22 марта 2017 г. — С.376-378.
5. Орехова Н.А., Романов А.С., Хоружий Д.С. Межгодовые изменения концентрации биогенных элементов в Севастопольской бухте за период 2006 – 2010 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.— вып.25.— С.192-199.
6. Стокозов Н.А. Морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.— вып.23.— С.198-208.

УДК 546.798.23(262.5)

#### **УРОВНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЛЬФА-РАДИОИЗОТОПА АМЕРИЦИЯ $^{241}\text{Am}$ В ЧЕРНОМОРСКОЙ ЭКОСИСТЕМЕ**

*Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю., Чужикова-Проскурнина О.Д.,*

*Параскив А.А., Крылова Т.А.*

*ФГБУН «Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН»,  
Севастополь, Россия*

Аннотация. Представлены результаты изучения уровней загрязнения и перераспределения долгоживущего альфа-радиоизотопа америция  $^{241}\text{Am}$  в Черном море в постчернобыльский период от двух основных источников его поступления — глобальных выпадений и аварии на Чернобыльской АЭС. Особенностью радиозоологии  $^{241}\text{Am}$  в настоящий период является факт увеличения его активности в природных экосистемах во времени, благодаря радиоактивному распаду его материнского короткоживущего радионуклида  $^{241}\text{Pu}$ . Установлено, что в глубоководных донных отложениях повышенные уровни загрязнения плутонием через четверть века привели к накоплению повышенных уровней  $^{241}\text{Am}$  до 26 Бк/кг в слое осадка, сформированному в период максимальных чернобыльских выпадений. В период исследований концентрационная активность  $^{241}\text{Am}$  составляла от 0,1 до 2,0 Бк/кг в поверхностном слое осадка в прибрежных и глубоководных районах, а растворенного америция в поверхностных водах — 1,2-1,3 мБк/м<sup>3</sup>. Донные осадки, а также многоклеточные водоросли и взвешенное вещество проявляют высокую аккумуляционную способность в отношении америция. В то же время радиоизотопу америция свойственны отличия в биохимическом поведении по сравнению с плутонием.

Ключевые слова: радиоизотоп америция  $^{241}\text{Am}$ , донные отложения, вода, макроводоросли, Черное море

#### **LEVELS OF CONTAMINATION AND REDISTRIBUTION OF AMERICIUM ALPHA-RADIOISOTOPE $^{241}\text{Am}$ IN THE BLACK SEA ECOSYSTEM**

*Tereshchenko N.N., Proskurnin V.Yu., Chuzhikova-Proskurnina O.D., Paraskiv A.A., Krilova T.A.*

*The A.O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS,  
Sevastopol, Russian Federation*

Abstract. The performed scientific research was devoted to the study of contamination levels and redistribution of the long-lived americium alpha-radioisotope  $^{241}\text{Am}$  in the Black Sea

in the post-Chernobyl period from two main sources of its input – global fallout and the Chernobyl NPP accident. Peculiarity of the  $^{241}\text{Am}$  radioecology is a fact of its activity increase in natural ecosystems in the present period, due to the radioactive decay of its mother short-lived radionuclide  $^{241}\text{Pu}$ . It was found that elevated levels of plutonium contamination in deep-sea sediment in a quarter of the century have led to the accumulation of the increased  $^{241}\text{Am}$  levels up to 26 Bq/kg in the bottom sediment layer formed during the period of maximum Chernobyl fallout. In the period of research the activity concentration of  $^{241}\text{Am}$  has changed from 0.1 to 2.0 Bq/kg in the surface bottom sediment layer in coastal and deep-sea areas, and dissolved americium in surface water – 1.2-1.3 mBq/m<sup>3</sup>. It is revealed that bottom sediment, multicellular algae and suspended matter had shown a high accumulation capacity with respect to americium. At the same time, the americium radioisotope is characterized by differences in biochemical behavior in comparison with plutonium.

Key words: americium radioisotope  $^{241}\text{Am}$ , bottom sediment, water, multicellular algae, the Black Sea

Радиоизотоп америция  $^{241}\text{Am}$  является долгоживущим техногенным альфа-излучающим изотопом, поступление которого в Черное море было обусловлено испытаниями ядерного оружия в открытых средах и последовавшими за ними глобальными радиоактивными выпадениями, а также авариями на объектах атомной промышленности и применением этих радионуклидов в различных сферах. Среди техногенных инцидентов в бассейне Черного моря одним из крупнейших является авария 1986 г. на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС).  $^{241}\text{Am}$  является дочерним радионуклидом плутония  $^{241}\text{Pu}$ . Активность  $^{241}\text{Pu}$  как в аварийном выбросе ЧАЭС, так и в глобальных выпадениях была почти на два порядка выше, чем у альфа-излучающих изотопов плутония [2, 6]. Период полураспада  $^{241}\text{Pu}$  составляет 14,35 года, что более чем на порядок меньше периода полураспада  $^{241}\text{Am}$  (443 года), поэтому активность  $^{241}\text{Am}$  в настоящее время в окружающей среде непрерывно возрастает, и достигнет максимума для  $^{241}\text{Am}$  глобальных выпадений к 2037 г. [5], а для  $^{241}\text{Am}$  чернобыльского происхождения - к 2059 г. [1,3].

Черное море расположено в Северном полушарии в широтном поясе (40°-50° с. ш.), на который приходится максимум глобальных выпадений [5, 6]. Несмотря на то, что  $^{241}\text{Am}$  не образуется непосредственно во время ядерного взрыва, значительное его количество присутствует в глобальных выпадениях благодаря распаду  $^{241}\text{Pu}$ , и может быть оценено на основании данных об изотопном составе плутония [5]. Отношение активностей  $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$  в глобальных выпадениях на февраль 1974 года, рассчитанное по данным приведенным в [5] составило 0,22. Плотность глобальных выпадений  $^{239,240}\text{Pu}$  между 40° и 50° с. ш. составила 2,2 мКи/км<sup>2</sup> или 81,4 МБк/км<sup>2</sup> [7], поэтому учитывая площадь Черного моря (436 400 км<sup>2</sup>), а также отношение активностей  $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$ , можно оценить, что поступление  $^{241}\text{Am}$  глобальных выпадений в акваторию Черного моря было равно 7,8 ТБк.

Вторым значительным источником поступления америция является авария на ЧАЭС, в результате которой было выброшено 4,1 ТБк  $^{241}\text{Am}$  (в расчете на 06.05.1986 г.) и количество чернобыльского  $^{241}\text{Am}$  теперь возрастает за счет распада  $^{241}\text{Pu}$ , количество которого в выбросе после аварии на ЧАЭС оценивалось в 5,180 ПБк на 1986 г. [2].

Основная волна радиоактивных выпадений прошла в конце апреля – в мае 1986 г. В результате было зафиксировано поступление  $^{241}\text{Am}$  в поверхностные черноморские воды. Концентрационная активность его в воде составила 1-2 МБк/м<sup>3</sup> [2]. Исследования, выполненные в июне-сентябре 1986 г. в Черном море, дали подобные результаты. Концентрационная активность  $^{241}\text{Am}$  в поверхностных водах изменялась в диапазоне 0,1-2,1 МБк/м<sup>3</sup> [6], а отношение  $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$  варьировало в диапазоне от 0,013 до 0,29. Поступление америция в Черное море в последующие годы происходило различными путями. Его миграция и пополнение запаса за счет распада  $^{241}\text{Pu}$  сформировали итоговые концентрации  $^{241}\text{Am}$  в воде и других компонентах черноморских экосистем. Изучение уровней загрязнений ком-

понент черноморских экосистем  $^{241}\text{Am}$  и перераспределение америция в водоеме в прибрежных и глубоководных районах было целью данной работы.

Районами исследований служили прибрежные акватории сева­сто­польских бухт, Каркинитский залив, шельф северо-западной части моря и глубоководная зона в западной части Черного моря.

Для определения  $^{241}\text{Am}$  из природных проб использовали известные методы на основе термического и химического сжигания проб с последующим концентрированием, очисткой и выделением америция с помощью многоступенчатой ионообменной колоночной хроматографии [2]. Изготовленные путем электролитического осаждения тонкослойные препараты америция измеряли на альфа-спектрометрическом комплексе "ORTEC". В качестве радиотрассера для расчета химического выхода америция в пробы вносили  $^{243}\text{Am}$ .

Концентрационная активность  $^{241}\text{Am}$  в донных осадках и во взвеси представлена в Бк или мБк/кг сухой массы, в воде – мБк/м<sup>3</sup>, в гидробионтах – мБк/кг сырой массы.

Проведенные ранее исследования послы­но­го распределения изотопов плутония и америция в донных отложениях северо-западной части Черного моря свидетельствуют о том, что в слое осадка, соответствующего периоду максимального поступления чернобыльских радионуклидов концентрационная активность  $^{241}\text{Am}$  в поверхностном слое донных отложений составляла более 500 мБк/кг на 1998 г. [2]. Максимальное поступление америция в северо-западную часть моря с речным стоком было приурочено к концу 80-х – началу 90-х годов XX века. Это отражало транзитное время переноса терригенных частиц как основного источника поступления  $^{241}\text{Am}$  с площадей водосборного бассейна в устьевые зоны, а также оно было связано с величиной речного стока, особенно в половодье. К концу 90-х годов концентрационные активности плутония и америция в поверхностных слоях донных отложений северо-западной части моря уменьшились, вследствие перекрытия максимально загрязненных донных отложений менее загрязненными поверхностными слоями осадков и стабилизировались. В этот период концентрационная активность  $^{241}\text{Am}$  составляли около 100 мБк/кг [2].

Экспериментальным путем было установлено [8], что для черноморских прибрежных донных отложений в аэробных условиях коэффициенты накопления америция составляли величины порядка 3800 единиц. Доля выведенного америция в течение 30 суток не превышала 70 %. Это характеризует высокую аккумуляционную способность черноморских донных отложений в отношении америция и достаточно высокий процент прочного связывания с донными осадками, поэтому больше внимания нами было уделено изучению загрязнения  $^{241}\text{Am}$  донных отложений.

По результатам наших наблюдений концентрационная активность  $^{241}\text{Am}$  в современный период (на 2012-2013 гг.) составляла разные величины в зависимости от глубины залегания слоя осадка и от района моря и изменялась от 0,1 до 26 Бк/кг. В поверхностном слое в прибрежных районах это были величины порядка 0,40, а в глубоководной зоне – порядка 2,0 Бк/кг. В глубоководной зоне в слоях осадка в период максимальных чернобыльских выпадений концентрационная активность  $^{241}\text{Am}$  равнялась 25,6 Бк/кг и относилась к слою осадка 2,75-3,00 см. В прибрежных районах слой максимальных чернобыльских выпадений залегал значительно глубже в Севастопольской морской акватории (например, в Стрелецкой бухте от 10 до 12 см и был более размытым), а в северо-западной части Черного моря глубже 20 см. Чем больше скорость осадконакопления в исследуемом районе [2], тем более глубоко залегал пик активности  $^{241}\text{Am}$  в донных осадках. Радиоизотоп америция, как и его материнский радионуклид  $^{241}\text{Pu}$  в силу своих физико-химических свойств связывается с частичками взвешенного вещества, и процессы биогеохимической седиментации играют существенную роль в перераспределении америция в морской экосистеме. Но, значительно более высокие значения концентрационных активностей америция в глубоководном районе моря, по сравнению с прибрежными акваториями, вероятно, связаны с историей поступления чернобыльских выпадений. Основное загрязнение

трансурановыми элементами черноморских акваторий произошло в ранний период после аварии путем воздушного переноса, значительная часть которого мигрировала в донные отложения в центральной части западной халистатик. Поэтому высокие концентрации радионуклидов плутония в этом районе [4], по истечению более четверти века после аварии на ЧАЭС привели к накоплению в этом слое осадков за счет распада  $^{241}\text{Pu}$  повышенных уровней  $^{241}\text{Am}$  (до 25,6 Бк/кг). Нарастание  $^{241}\text{Am}$  за счет распада  $^{241}\text{Pu}$  обеспечивает также более высокое содержание америция в поверхностных водах по сравнению с радионуклидами плутония. В прибрежных районах северо-западной части и в открытом районе западной части Черного моря концентрационная активность растворенного в воде  $^{241}\text{Am}$  в 2012-2013 гг. варьировала незначительно и составляла  $1,2 - 1,3 \text{ мБк/м}^3$ , что почти на порядок величин выше, чем концентрационная активность  $^{239+240}\text{Pu}$  ( $0,185 \text{ мБк/м}^3$ ). При этом концентрационная активность  $^{241}\text{Am}$  во взвеси в прибрежных водах в разные сезоны изменялась в пределах от 55 до 161 мБк/кг, что указывает на высокую аккумуляционную способность взвеси в отношении  $^{241}\text{Am}$  и составляла близкие величины к таковым, характерным для радионуклидов плутония в этом районе. Концентрационная активность Pu во взвеси составляла 34-165 мБк/кг, но растворенного Pu в воде –  $0,04 \text{ мБк/м}^3$ . Активно америций накапливали также и гидробионты. Красная макроводоросль *Phyllophora crispa* (Handson) P.S. Dixon на Большом филлофорном поле Зернова содержала  $15,3 \pm 2,0$ , а в Каркинитском заливе –  $8,1 \pm 1,4 \text{ мБк/кг}$ . Коэффициент накопления *Ph. crispa* в отношении  $^{241}\text{Am}$  достигал значений  $n \times 10^4$ .

Как уже было отмечено, активность дочернего  $^{241}\text{Am}$  будет возрастать и достигнет наибольших значений порядка  $1,6 \cdot 10^{14} \text{ Бк}$  к 2059 г. [2, 3]. В этот период ожидается максимальный вклад  $^{241}\text{Am}$  в дозу внутреннего облучения, он составит около 40 % от общей дозы [2]. Суммарная доза облучения к 2059 г. будет уменьшаться за счет радиоактивного распада основных дозообразующих радионуклидов ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238,239,240}\text{Pu}$ ). Следовательно, роль  $^{241}\text{Am}$  как дозообразующего нуклида возрастает во времени только относительно, т.к. это увеличение нивелируется радиоактивным распадом смеси дозообразующих радионуклидов, а также их перераспределением в почвах и донных отложениях.

По натурным наблюдениям за миграцией америция в природных экосистемах установлено, что ему свойственен ряд особенностей биогеохимического поведения, связанных с его физико-химическими свойствами, постоянным его образованием в результате распада  $^{241}\text{Pu}$ , на эти процессы влиянием биотических компонент. Прогнозируемое отношение между  $^{241}\text{Am}$  и  $^{239,240,238}\text{Pu}$ , в результате его образования за счёт распада материнского радионуклида  $^{241}\text{Pu}$  в черноморском выбросе возрастает и приближается к 1 в текущий период, но, по натурным наблюдениям в некоторых компонентах водных экосистем это отношение существенно отличается от расчетной величины [2]. Если в черноморских экосистемах для взвешенного вещества оно равно или незначительно выше единицы (1-1,6), то для макроводоросли филлофоры составляло 0,15-0,16, что указывает на различную аккумуляционную способность этих гидробионтов в отношении америция и плутония. Для донных отложений в глубоководной зоне Черного моря оно имеет самое высокое значение в слое максимальных черноморских выпадений (1,6) и уменьшается к поверхности осадка до 0,7 и затем до 0,3, что свидетельствует об уменьшении доли черноморского радиоактивного загрязнения в суммарном загрязнении осадков радионуклидами америция и плутония. Это указывает на наличие не только сходства, но отличий биогеохимического поведения америция по сравнению с плутонием.

Перераспределение америция в компонентах экосистемы Черного моря требует дальнейшего изучения для характеристики механизмов и количественных показателей миграции  $^{241}\text{Am}$  в водоеме с целью текущей и прогнозных оценок радиоэкологической ситуации в море в целом и в отдельных его акваториях.

Авторы выражают благодарность Мильчаковой Н.А. за отбор и определение видовой принадлежности макроводорослей.

## Литература

1. Гулин С.Б., Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю. Радиоэкологическое значение плутония-241 и методика его определения в объектах окружающей среды // Зб. наук. праць СНУАЕтаП. – Екологічна безпека. – Севастополь: СНУАЕтаП, 2010. – Вип. 2 (34). – С. 88–95.
2. Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г.Г.Поликарпова и В.Н. Егорова. – Севастополь: «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2008. – 667с.
3. Терещенко Н.Н. Содержание трансурановых элементов Pu, Am, Cm в донных отложениях и прилегающих почвах в ближней зоне ЧАЭС и на юге Украины / Радиоэкология: успехи и перспективы. – Севастополь. – 1996. – С.177–182.
4. Н.Н. Терещенко, С.Б. Гулин, В.Ю. Проскурин Радиоэкологические закономерности перераспределения альфа-радионуклидов плутония в экосистеме Черного моря // Морской биологический журнал. – 2016, Том 1, № 3, с. 3–13.
5. Трансурановые элементы в окружающей среде / Под ред. Т. Хенсона. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 344 с.
6. Artificial radioactivity of the Black Sea. UNESCO Reports in Marine Science 59. 6 Nov. 1993. – UNESCO, 1993. – P. 46–77.
7. Hardy E.P., Krey P.W., Nolph H.L. Global Inventory and Distribution of Fallout Plutonium // Nature. – 1973. – Vol. 241, № 5390. – P. 444–445.
8. Topcuo lu S., Güng r N., Kırbaşo lu Ç. Distribution coefficients (Kd) and desorption rates of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{241}\text{Am}$  in Black Sea sediments // Chemosphere, 2002. – 49. - P. 1367–1373.

УДК 504.054(262.5)

## РАДИОЭКОЛОГИЯ ТЕХНОГЕННЫХ АЛЬФА-ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ В ЧЕРНОМ МОРЕ

*Терещенко Н.Н.*

*ФГБУН «Институт морских биологических исследований им. В.О. Ковалевского РАН»,  
Севастополь, Россия*

Аннотация. Проведены исследования и анализ данных в области радиоэкологии альфа-излучающих радиоизотопов плутония  $^{239,240}\text{Pu}$  в Черном море в постчернобыльский период. Определены количественные характеристики их перераспределения в компонентах экосистем моря, включая уровни загрязнения, аккумуляционную способность отдельных компонент, период эффективного полууменьшения Pu в поверхностных водах, его седиментационные потоки. На примере прибрежной акватории сделана оценка вклада в вынос плутония из фотического слоя вод седиментационными потоками в осадки, движением водных масс и посредством аккумуляции гидробионтами. Выявлено ряд особенностей радиоэкологических закономерностей и биогеохимического поведения плутония в экосистеме Черного моря. Установлено, что специфика биогеохимического поведения плутония, обусловлена, с одной стороны, характеристиками водоема, а с другой стороны, физико-химическими свойствами самого плутония. Полученные результаты позволили предложить схему оценки текущей и прогностической радиоэкологической ситуации акваторий моря в отношении изученных радионуклидов  $^{239,240}\text{Pu}$  по биогеохимическим и эквидозиметрическим критериям.

Ключевые слова: альфа-излучающие радиоизотопы плутония ( $^{239,240}\text{Pu}$ ), перераспределение в компонентах экосистемы, оценка радиоэкологической ситуации акваторий, биогеохимический и эквидозиметрический критерии, Черное море.